

(10)日本国特許庁 (J P)

(12) 公開特許公報 (A)

(11)特許出願公開番号

特開平9-139380

(40)公開日 平成9年(1997)5月27日

(51)IntCl <sup>4</sup>	識別記号	庁内整理番号	P I	技術表示箇所
H01L 21/302			H01L 21/302	B
C23F 4/00			C23F 4/00	G
H05H 1/46			H05H 1/46	A

審査請求 未請求 請求項の総数 84 O L 外国語出願 (全 48 頁)

(21)出願番号 特願平9-255259

(22)出願日 平成8年(1996)8月21日

(31)優先権主張番号 08/517178

(32)優先日 1995年8月21日

(33)優先権主張国 米国 (US)

(71)出願人 390040880

アプライド マテリアルズ インコーポレイテッド

APPLIED MATERIALS, INCORPORATED

アメリカ合衆国 カリフォルニア州

95054 サンタ クララ パウアーズ アベニュー 3050

(72)発明者 ホンチン シャン

アメリカ合衆国 カリフォルニア州,

サン ノゼ, タンプル ウェイ 3630

(74)代理人 弁理士 長谷川 芳樹 (外3名)

最末页に続く

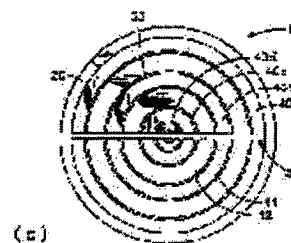
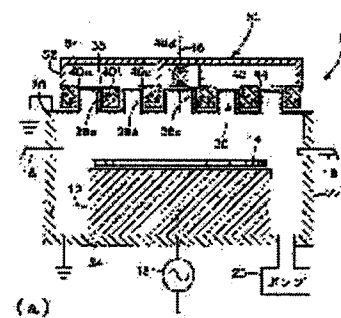
(54)【発明の名称】 電子の軌道によりプラズマ処理を向上するための強い磁場

(57)【要約】 (修正有)

【課題】 ウエハ表面で最も弱くリアクタチャンパ内の他の場所で最も強いMERIE磁界を提供する。

【解決手段】 半導体ウエハ等、対称軸を有するワークピース14を処理するためのプラズマリアクタにおいて具体化されるものであり、このリアクタは、天井20を有するリアクタチャンパ10と、チャンパ内の天井の下でワークピース14を支持するベDESTAL12と、チャンパ内に差し込まれたプロセスガス供給機構と、ベDESTALに結合されたRFプラズマ電源18と、チャンパ10の天井近くの部分の中で対称軸45に関して半径方向

に対称な磁界を提供する天井近くの磁界ソースを備える。



【特許請求の範囲】

【請求項 1】 ワークピースを処理するためのプラズマリアクタであって、

天井を有するリアクタチャンバと、  
前記チャンバの内部の前記天井の下方で前記ワークピースを支持するためのベDESTALと、

前記チャンバへのプロセスガス供給流入口と、  
前記チャンバの中へのプロセスガス供給流入口と、

前記ベDESTALに結合したRFプラズマ電源と、  
前記チャンバの前記天井の近くの部分の中で、前記チャンバの対称軸について半径方向に対称な磁界を提供する、前記天井近くの磁界ソースと、を備えるリアクタ。

【請求項 2】 前記磁界ソースが、前記対称軸に対して半径方向に対称な様式で前記天井の上に配置される複数の磁石を備える請求項 1 に記載のリアクタ。

【請求項 3】 前記複数の磁石が、(a) 永久磁石と、  
(b) 電磁石との一方を有する請求項 2 に記載のリアクタ。

【請求項 4】 前記半径方向に対称な磁界が、前記天井から前記チャンバ内へ、或る浅い深さで浸透し、前記ワークピースの上からの前記天井の高さが前記深さよりも大きい請求項 2 に記載のリアクタ。

【請求項 5】 前記複数の磁石が、前記天井の上にあり前記対称軸に中心を有する、複数のリング磁石を有する請求項 2 に記載のリアクタ。

【請求項 6】 前記磁界ソースが更に、前記天井の上且つ前記対称軸上に配置され、前記複数のリング磁石が作り出す磁界に積極的に関与する磁界を有する導磁石を備える請求項 5 に記載のリアクタ。

【請求項 7】 前記リング磁石及び前記導磁石が永久磁石である請求項 6 に記載のリアクタ。

【請求項 8】 前記複数の磁石が、中心が対称軸にあるそれぞれの極と位置合わせをされた複数のスポーク状磁石を備える請求項 2 に記載のリアクタ。

【請求項 9】 前記複数のスポーク状磁石が永久磁石である請求項 8 に記載のリアクタ。

【請求項 10】 前記複数のスポーク状磁石が電磁石である請求項 8 に記載のリアクタ。

【請求項 11】 前記磁界ソースが電磁石を備える請求項 1 に記載のリアクタ。

【請求項 12】 前記電磁石が、単一の導体経路で形成され前記ベDESTALの前記対称軸について半径方向に対称な様式で配置された複数の巻線を備え、前記導体経路は、電流を受容するための端部を2つ有する請求項 11 に記載のリアクタ。

【請求項 13】 前記電磁石の前記複数の巻線が、中心孔を有する円環体内に閉じ込められる請求項 12 に記載のリアクタ。

【請求項 14】 前記磁界ソースが更に、前記天井の上に、前記電磁石の前記円環体の前記中心孔内に位置する

中心磁石を有し、前記中心磁石が、前記電磁石の磁界に積極的に関与する磁界を有する請求項 13 に記載のリアクタ。

【請求項 15】 前記中心磁石が、前記電磁石の前記巻線と同じ回転方向に巻かれた巻線を含むコイルインダクタを備える請求項 14 に記載のリアクタ。

【請求項 16】 前記電流が、(a) 直流電流と、  
(b) 交流電流と、(c) RF電流と中の1つである請求項 12 に記載のリアクタ。

【請求項 17】 前記天井が天井電極を備え、前記RF電源が前記ベDESTALと前記天井電極の間に接続される請求項 1 に記載のリアクタ。

【請求項 18】 前記RF電源からの電力を前記ベDESTALと前記天井電極との間で配分する回路を更に備える請求項 17 に記載のリアクタ。

【請求項 19】 前記回路が、前記RF電源の両端に接続されたコイルインダクタと、前記コイルインダクタの選択した巻線をアースに接続する可動接地タップとを備える請求項 18 に記載のリアクタ。

【請求項 20】 前記天井が、複数の内側チャンネルと外側チャンネルとを形成する複数のひだを有し、前記複数の磁石が前記複数の外側チャンネル内に配置され、前記プロセスガスの少なくとも一部分が前記内側チャンネル内に存在する請求項 2 に記載のリアクタ。

【請求項 21】 前記複数の磁石のそれぞれが対立する一対の磁極を有し、共通内側チャンネルに隣接する磁石と磁石の対立する極と極が前記内側チャンネルを挟んで向かい合い、それにより前記内側チャンネルを横切る略直線の磁力線を形成する請求項 20 に記載のリアクタ。

【請求項 22】 前記天井が複数の内側環状チャンネルと外側環状チャンネルとを形成する複数の環状のひだを有し、前記複数のリング磁石が前記複数の外側環状チャンネル内に配置され、前記プロセスガスの少なくとも一部分が前記内側環状チャンネル内に存在する請求項 5 に記載のリアクタ。

【請求項 23】 前記複数のリング磁石がそれぞれ、その相対する周辺面上に対立する一対の磁極を有し、共通内側チャンネルに隣接するリング磁石とリング磁石の対立する極と極が、前記内側チャンネルを挟んで向かい合い、それにより前記内側チャンネルを横切る略直線の磁力線を形成する請求項 22 に記載のリアクタ。

【請求項 24】 前記半径方向に対称な磁界が、前記チャンバ内の半径方向の位置によって変化する磁界の強さを有する請求項 1 に記載のリアクタ。

【請求項 25】 前記リング磁石が、磁界の強さが所定の段階で変化する磁界の強さを有する請求項 5 に記載のリアクタ。

【請求項 26】 前記複数のリング磁石の前記磁界の強さが、半径方向の位置の関数である請求項 25 に記載のリアクタ。

【請求項 27】 前記巻線の密度が、前記円環体内の半径方向の位置の関数である請求項 13 に記載のリアクタ。

【請求項 28】 前記関数が半径方向に増大し、それにより、前記円環体の外周近くで巻線の密度が大きくなる請求項 27 に記載のリアクタ。

【請求項 29】 前記複数の磁石のうちの半径方向最も内側の磁石の一方の磁極と、前記複数の磁石のうちの半径方向最も外側の磁石の反対の磁極とに接続された磁気ヨークを更に備える請求項 5 に記載のリアクタ。

【請求項 30】 対称軸を有するワークピースを処理するためのプラズマリアクタであって、天井を有するリアクタチャンバと、前記チャンバ内の前記天井の下方で前記ワークピースを支持するためのベデスタルと、前記チャンバへのプロセスガス供給入口と、前記ベデスタルに結合した RF プラズマ電源と、前記チャンバの前記天井の近くの部分の中で、前記対称軸について半径方向に対称な磁界を提供する、前記天井近くの磁界ソースと、を備えるプラズマリアクタ。

【請求項 31】 前記ワークピースが、ディスク状で、手を垂直方向に延びる対称軸を有する請求項 30 に記載のリアクタ。

【請求項 32】 前記磁界ソースが、前記天井の上方に、前記対称軸に関して半径方向に対称的に配置された複数の磁石を備える請求項 30 に記載のリアクタ。

【請求項 33】 前記複数の磁石が、(a) 永久磁石と、(b) 電磁石との一方を有する請求項 32 に記載のリアクタ。

【請求項 34】 前記半径方向に対称な磁界が、前記天井から前記チャンバ内へ、或る浅い深さで浸透し、前記ワークピースの上からの前記天井の高さが前記深さよりも大きい請求項 32 に記載のリアクタ。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】 本発明は、磁気励起反応性イオンエッチ (MERIE) プラズマリアクタに関し、具体的には、ウエハ表面で最小の強度を有し、ウエハ表面全体に対して半径方向に対称な、浅い磁界を有する MERIE プラズマリアクタに関する。

【0002】

【従来の技術】 半導体ウエハ等の基板を処理するプラズマリアクタは、典型的には、プロセスガスを収容するリアクタチャンバと、チャンバ内でウエハを支持するベデスタルとを有する。プロセスガスをイオン化してプラズマを点火するためには、ウエハベデスタルに高周波 (RF) 電源が適用される。チャンバに結合した RF 電力は、プラズマを点火してこれを維持し、同時に、ウエハベデスタルの方へとイオンを引き寄せ、RF 電力は、その高い電荷質量比によりチャンバ内の電子を励起し、

励起された電子は、プロセスガスの中性化学種 (例えば、分子やラジカル) と衝突してイオンを生成する。このイオンは、ベデスタル上のウエハと反応して、例えばウエハ上の特定の薄膜をエッチングし、他方、イオンがウエハ表面に衝突するエネルギーによって、ウエハ表面にイオン衝撃又はスパッタリングによる損傷を引き起こす。イオンのエネルギーは、ウエハベデスタルに印加される RF 電力によって決まる。

【0003】 このようなプラズマリアクタでは、プラズマ密度とイオン衝撃によるウエハの損傷とが相殺し合うことが大きな制限となる。これは、チャンバ内のプラズマイオン密度を高めるためには、ウエハベデスタルに印加する RF 電力を大きくしなければならず、これが、ウエハ表面のイオンエネルギーを高めて、イオン衝撃による損傷を大きくするためである。この相殺により、プラズマリアクタの性能が制限される。プラズマエッチングを行うプラズマリアクタにおいて、プロセスガスは、例えば HF、CF<sub>3</sub>、CF<sub>6</sub> などのエッチャントであり、そのエッチレートはほとんど弗素イオンの密度によって決まり、この弗素イオン密度は、ウエハベデスタルに印加する RF 電力を抑えてウエハに対する過度のイオン衝撃による損傷を防ぐために制限される。

【0004】 もう 1 つの問題は、RF 電力 (プラズマイオン密度を高めるための) によって、チャンバの天井面と壁面のスパッタリングが大きくなることである。このようにスパッタリングが大きくなると、チャンバ内部及びウエハ上に導入されるスパッタ材料の量が増え、これが、エッチング処理を妨げることがある。例えば、天井が石英でありウエハに行なう処理が二酸化珪素のエッチングプロセスの場合は、天井からスパッタリングされたある量の石英がウエハ表面に堆積してエッチング処理と競合することにより、エッチレートが低くなる。また、天井が、ウエハ上で行なう特定のエッチングと両立する材料 (例えば、二酸化珪素のエッチング処理では二酸化珪素又は石英の天井、アルミニウムエッチング処理ではアルミニウムの天井) でない限り、チャンバ内にスパッタリングされた天井材料によってウエハが汚染される (また、天井がスパッタリングされることにより、チャンバの高価な部品も消耗する)。別の例として、プロセスガスが CF<sub>3</sub> 又は CF<sub>6</sub> を含む場合は、天井の内側面に形成されたポリマー材料がウエハ表面にスパッタリングされて、ウエハ表面のマイクロ電子デバイスを汚染することがある。

【0005】 プラズマエッチング処理において、ウエハ上のイオン衝撃損傷やスパッタリングを必然的に大きくせずにプラズマイオン密度を高める技術の 1 つには、磁気励起反応性イオンエッチング (MERIE) がある。この技術では、チャンバ側面の周囲に対称的に配置した複数 (典型的には 4 つ) の環状の磁石を加えることによって、上記のプラズマリアクタを改良する。各磁石の直

径は、通常、リアクタチャンバの高さ程度である。これらの磁石でチャンバ内に作り出されたMERIE磁界によって、電子は、ウエハベDESTALに印加されたRF電力によって生じる縦方向の直線的な運動の他に、一層その大きな電荷質量比のために一層環状及び渦巻状の複雑な運動を生ずる。MERIE磁界によって生じた電子の環状及び渦巻状の運動によって、電子による電離衝突が増大して、プラズマイオンの密度を高める。この結果、イオン密度が一層即ちエッチレイトが一層上昇する。しかし、これと引き換えにウエハ上のイオン衝撃による損傷が増大することではなく、何故なら、ウエハベDESTALに印加されるRF電力を大きくしていないからである。更に、MERIE磁界によってイオンの渦巻状の運動が生じて、イオンとウエハの衝突エネルギーを直接高めることはない。

【0006】イオンとウエハの衝突エネルギーは、MERIE磁界によって、これに見合うように大きくなることはなく、何故なら、MERIE磁界によって生じるイオンの渦巻状の運動は、一般に、水平面（ウエハ面に平行）内にあるからである。

【0007】このようなMERIE技術の1つの問題点は、チャンバ内の磁界が、（4つの）隣接する別個の磁石によって作り出されるために、必然的に不連続なことである。プラズマイオンが、磁石と磁石の間の「コーナー」領域に集中しやすく、このため、ウエハ表面全体でエッチレイトが不均一になり、大きな不利益が生じる。更に、プラズマイオンは、ウエハのエッジの方に移動しウエハの中心から離れる傾向があり、これが、エッチレイトをウエハ表面横方向で不均一にする原因となることだが、一般的に見出されている。しばしば、エッチレイトは、ウエハの所与の半径に沿って大きく変化しやすく、ウエハ上のエッチレイトが半径方向に沿って大きくなる。

【0008】この不均一なエッチレイトの問題は、MERIEプラズマリアクタにおいて、チャンバ側面の周囲に配置した複数の（4つの）磁石が作り出す磁界を回転させることによって改善された。このように回転させることは、典型的には、電磁石をチャンバ側面の周囲に採用しこれらの電磁石の巻線にRF信号を印加することによって実施される（例えば、1つおきの磁石の巻線に正弦波RF信号を加え、残りの磁石の巻線に同じ周波数の余弦波RF信号を加える）。この考え方は、ウエハ表面を横切るチャンバ内の磁界の回転によって、コーナーによる影響が分散され、イオン集中が減少し、それによりウエハ表面横方向のプラズマイオンの不均一性が減少するというものであり、係る問題に対する部分的な解決策を与える。

【0009】

【発明が解決しようとする課題】しかし、この解決策は、更に別の2つの問題を引き起こす。第1に、MER

IE磁界の回転は、チャンバ側壁の過熱を防止するための10ヘルツよりも低く制限しなければならず、そのため、効果が制限される。第2に、ウエハ表面全体にわたるMERIE磁界の回転によって、ウエハ表面に既に作製されたマイクロ電子半導体構造体に電荷による損傷が起こる。例えば窓型のゲート酸化物層は、特に破壊されやすい。ウエハ表面全体の磁界の変化が、リアクタ内でのプラズマ処理中にマイクロ電子構造体内に既に蓄積されている電荷に比較的大きな力を生じさせるため、この破壊が生じるものである。

【0010】磁界の回転がない場合でも、磁界自体がウエハ表面全体に不均一なためにプラズマイオン及び電子の密度もウエハ表面全体に不均一になり、マイクロ電子構造体に電荷による損傷が生じる危険がある。このウエハ表面全体に不均一に分散したプラズマイオン及び電子は、ウエハ表面全体に不均一な電荷蓄積と電位差を生じる。この電位差は、ウエハ上のマイクロ構造体の壊れやすい特徴的形状（例えば、窓型のゲート酸化物層）を破壊するのに充分である。従って、本発明者は、MERIE磁界がウエハ表面にあること自体が、MERIEリアクタの性能を制限する問題点であることを認識している。

【0011】従って、本発明の目的は、ウエハ表面では最も弱くなりリアクタチャンバ内の他の場所では最も強くなるようなMERIE磁界を提供することである。

【0012】本発明のもう1つの目的は、ウエハ表面全体における均一性を改善したMERIE磁界を提供することである。

【0013】本発明の関連した目的は、ウエハ表面の半径方向に対称的なMERIE磁界を提供することである。

【0014】

【課題を解決するための手段】本発明は、対称軸を有する半導体ウエハ等、ワークピースを処理するためのプラズマリアクタにおいて具体化され、このリアクタは、天井を有するリアクタチャンバと、チャンバ内の天井の下でワークピースを支持するベDESTALと、チャンバ内へのプロセスガス供給流入口と、ベDESTALに結合したRFプラズマ電源と、チャンバの天井近くの部分の内部で対称軸に関して半径方向に対称的な磁界を与える天井近くの磁界ソースとを有する。磁界ソースは、対称軸に関して半径方向に対称的に天井の上に配置された電磁石又は複数の磁石を有する。複数の磁石は、永久磁石でも電磁石でもよい。半径方向に対称的な磁界が天井からチャンバ内へと浸透する深さは浅く、ワークピース上方の天井の高さはその深さよりも高い。

【0015】複数の磁石は、天井の上の対称軸に中心を合わせた複数のリング磁石でもよい。リング磁石は、天井の上の対称軸上に配置され、複数のリング磁石が作り出した磁界に積極的に関与する磁界を有する導磁石で補

うこともできる。あるいはこれに替えて、複数の磁石は、中心が対称軸にあるそれぞれの極（や）と位置合わせをされた複数のスポーク状磁石でもよい。

【0016】磁界ソースが電磁石の場合は、単一の導体経路で形成され且つ対称軸に関して半径方向に対称的に配置された。複数の巻線を有していてもよく、この導体経路は、電流を受容する端部を2つ有している。この複数の巻線は、中心孔を有する円環体の中に閉じ込めてもよい。

【0017】

【発明の実施の形態】図1(a)及び図1(b)を参照すれば、MERIEプラズマリアクタは、チャンバ内で半導体ウエハ等のワークピース14を支持するベDESTAL 12を有するチャンバ10を有している。ガス流入口16は、チャンバ10の内部にプロセスガス（エッチャントガス等）を供給する。ベDESTAL 12とアースの間に接続されたRF電源18が、チャンバ内のプロセスガスをイオン化してチャンバ内にプラズマを提供し維持するのに充分な電力を提供する。電源18は、電源18の出力インピーダンスとチャンバ内のプラズマによって生じる負荷インピーダンスとの間のインピーダンス整合を維持するための、従来のインピーダンス整合回路を有している。チャンバ10は、アルミニウム、シリコン又は石英でできた丸い天井20と、アルミニウム製の円筒状の側壁22と、底面24とによって囲われている。典型的には、天井20及びチャンバ10の側壁22は接地される。真空ポンプ25が、チャンバ10内の圧力を制御する。

【0018】本発明に従えば、天井20は、内部に、環状同心の天井ひだ26a、26b、26cを備えている。天井ひだ26のそれぞれは、チャンバ10の外側の一方の外部環状チャンネル35の側方に位置するチャンバ10内側の内部環状チャンネル30を画成する。プロセスガスとプラズマは、内部環状チャンネル30を含むチャンバの内部を満たす。この目的のため、プロセスガス流入口16が、円筒状側壁22に沿って（図に示したように）、あるいは各内側環状チャンネル30の上部に、配置されてもよい。

【0019】チャンバ10の外側のリング磁石40a、40b、40cが、外側環状チャンネル35それぞれの中にある。内周部分42が磁石の一方の極（例えば、S極）を構成し外周部分44が磁石の反対の極（例えば、N極）を構成するように、磁石40のそれぞれが磁化される。図1(a)に示したように、内側環状チャンネル30は対立する磁極と磁極の間にあるため、磁力線が、円筒状チャンバ10の対称軸46に対しほぼ放射状に、各内側環状チャンネル30の中を延びていく。

【0020】天井20の中心にある中央ひだ26cの上には、中心磁石40dがある。中心磁石40dのN極は、中心のひだ26cの上部と隣り合っており、中心極

磁石40dのS極は、天井20から離れる向きにある。

【0021】本発明の趣意の特徴によれば、磁性材料（鉄など）のヨーク50を、最も内側の磁石（例えば、中心磁石40dとリング磁石40cのS極）の一方の極（例えば、S極）と、最も外側のリング磁石40aの反対の極（例えば、N極）に接続してもよい。ヨーク50の利点は、磁石40によって生じたMERIE磁界がウエハベDESTAL 12から離れるように更に閉じ込めることである。ヨーク50は、中心磁石40dと最も内側のリング磁石40cのS極及び最も外側のリング磁石40aのN極に接続する垂直部材52と、すべての垂直部材52に接続する水平部材54とを有している内側環状チャンネル30内部のプラズマの電子は、ウエハベDESTAL 12に印加されたRF電力によってほぼ垂直方向（ベDESTAL 12と天井20の間）に加速されるので、電子は、それぞれの内側環状チャンネル30を水平方向に横切って延びるMERIE磁界によって、およそ垂直軸のまわりに螺旋運動を行う。この付加的な（渦巻状の）電子の運動は、プロセスガスの中性の粒子（分子、ラジカル）とイオン化衝突を非常に多く引き起こすため、チャンバ10の中の内側環状チャンネル30の内部のプラズマイオン生成を増大させる。このことにより、RF電源18の電力を大きくすることなく、またそれによるウエハ上のイオン衝撃による損傷を増大させることなく、チャンバ10内全体のプラズマイオン密度が高められる。

【0022】チャンバ10の内部のプロセスガスが弗素などのエッチャントを含む場合は、このイオン化のプロセスにより、ウエハ表面上の一定の材料（例えば、シリコンバルク、ポリシリコン層、二酸化珪素層など）と反応してエッチングを行う弗素イオンやラジカルが生成される。このようなエッチングプロセスにおいては、プラズマイオン密度が高いために、ウエハ上のイオン衝撃による損傷が増大することなくエッチレイトが高くなる。

【0023】図1(a)及び図1(b)のMERIEリアクタが提供する、従来のMERIEリアクタよりも優れた利点の1つは、磁界が非常に優れた均一性を有し且つ実際に半径方向に対称的であることである。これは、磁石40が環状の形状であることによるものである。その結果、ウエハ表面近くに電子又はイオンを集中させるコーナーが磁界に殆ど存在しなくなり、プラズマイオン密度がより均一になる。このプラズマイオン密度の均一性が高いため、ウエハ表面全体のエッチレイトの均一性ははるかに高くなるという大きな利点を提供される。この高い均一性のもう1つの利点は、従来のMERIEプラズマリアクタにおいて磁界のコーナー部あるいはイオン又は電子の集中によって生じる種類の（ウエハ上のマイクロ電子構造体における）電荷蓄積及び電荷損傷又は破損が減少することである。

【0024】図1(a)及び図1(b)のMERIEリ

アクタのもう1つの利点は、複数のリング磁石40によって作り出されるMERIE磁界が、一般に、内側環状チャンネル30に制限され、天井20から離れるにつれて急速に（およそ距離の2乗で）減少するため、ウエハ表面ではほとんど磁界が存在しなくなることである。従って、磁界内に存在する可能性のあるどのような不均一性も、ウエハ表面にほとんど又は全く直接的な影響を及ぼさない。これにより、磁界のコーナーの影響とウエハ表面の電荷集中が減少し、ウエハ表面のマイクロ電子構造体の電荷蓄積及び電荷による損傷が減少する。

【0025】所定のプラスマイオン密度に対して、磁石40の導入によりウエハベダスタル12に印加するRF電力を小さくすることができるが、何故なら、これらの磁石が作り出すMERIE磁界によってプラスマイオン密度が高められるからである。その結果、チャンバの天井及び壁面のスパッタリングが減少する。1つの利点は、チャンバ10内及びウエハ上に導入されエッチング処理を妨げる可能性のあるスパッタ材料の量が、チャンバの天井と壁面のスパッタリングの減少によって少くなることである。例えば、天井が石英で、ウエハ上に行なおうとする処理が二酸化硅素のエッチング処理の場合は、天井からスパッタリングされるわずかな量の石英がウエハ表面に付着してエッチング処理を妨害し、それによりエッチレイトが低下する。また、天井が、ウエハ上で行なわれる特定のエッチングと両立する材料（例えば、二酸化硅素のエッチングプロセスでは二酸化硅素が石英の天井、アルミニウムのエッチングプロセスではアルミニウムの天井）でない限り、チャンバ内にスパッタリングされた天井の材料がウエハを汚染する（また、天井のスパッタリングは、チャンバ10の高価な部品を消耗する）。もう1つの例として、プロセスガスがCF<sub>3</sub>又はCF<sub>6</sub>を含む場合は、それらのガスによって天井の内側面に形成されたポリマー材料が、ウエハ表面にスパッタリングされる場合があり、それにより、ウエハ表面上のマイクロ電子デバイスが汚染される。これらの問題は、本発明において、所与のプラスマイオン密度でイオンエネルギーを減少させることによって解決される。

【0026】図1(a)及び1(b)の具体例の1実施の更に他の利点は、チャンバの動作圧力の範囲が、誘導結合プラズマリアクタ（一般に圧力範囲が5~20Mtorrに制限される）よりも広い範囲（1~350Mtorr）であることである。

【0027】図1(a)及び図1(b)に示した具体例の一実施形態によれば、直径8インチ(20.3cm)の半導体ウエハを処理するためには、ウエハベダスタルの直径は約8インチ(20.3cm)であり、チャンバの直径は約12インチ(30.5cm)であり、3つのリング磁石40a、40b、40cの外径はそれぞれ、（最も外側のものから）8インチ(20.3cm)、6インチ(15.2cm)、4インチ(10.2cm)であり、中心磁石40dの

外径は約2インチ(5.1cm)である。内側環状チャンネル30の高さは約1インチ(2.54cm)であり、それぞれの内側環状チャンネル30の幅は約1インチ(2.54cm)である。それぞれの外側環状チャンネル35の幅は、約1インチ(2.54cm)である。リング磁石40のそれぞれは、外側環状チャンネル35の中にそれぞれフィットするよう、約1インチ以下の環状部幅を有している。各磁石40の磁界の強さは、約500ガウスである。本実施形態において、ウエハベダスタル12に印加したRF電力は、13、56MHzで約1000ワット、プロセスガス(HF)の流量は、チャンバ圧力約\_\_\_Mtorrのとき\_\_\_であった。

【0028】この実施形態の随意の特徴によれば、ウエハ表面のエッチレイトの内在的な不均一性を補償するよう、磁石40それぞれの磁界の強さを1つ1つ段階的に変化させるようにしてもよい。例えば、この不均一性が、エッチレイトがウエハ表面の中心から半径方向に大きくなるような不均一性である場合、中心磁石40dが最も大きい磁界の強さ（例えば、約500ガウス）を有し、最も内側のリング磁石40cが中間の磁界の強さ（例えば、約450ガウス）を有し、中間のリング磁石40bがより小さい磁界の強さ（例えば、約400ガウス）を有し、最も外側のリング磁石40aが最も小さい磁界の強さ（例えば、約350ガウス）を有するよう、磁石40の磁界の強さを段階的にすることによって、この不均一性を補償することができる。補償すべきエッチレイトの不均一性によっては、この段階づけを、磁石40の磁界の強さが天井20の中心から遠ざかるにつれて増大するように逆にすることもある。

【0029】図2(a)と図2(b)は、図1(a)及び図1(b)の実施形態の利点を享受しているが、MERIE磁界の強さを必要に応じて変更又は遮断できるといふ更なる利点を有する別の実施形態を示す。図2

(a)及び図2(b)の実施形態において、半径方向に対称的なMERIE磁界は、天井20の上の天井と平行な平面に位置する約40回巻の単一連続導体64の環状巻線52からなる円環型電磁石60によって提供される。図2(a)及び図2(b)の実施形態では、天井20は平坦でもよい。本明細書の中で前に説明したように、MERIE磁界の半径方向の対称性によって、磁界のコーナー及びウエハ表面におけるイオン/電子の集中が減少するが又は無くなる。図2(a)及び図2(b)の実施形態のMERIE磁界は比較的浅い（図1(a)及び図1(b)の実施形態と同様）ため、ウエハはMERIE磁界の有効範囲を越えたところにあり、そのため、ウエハ表面にイオンが集中せず、ウエハ表面のデバイスの電荷損傷を防ぐことができる。

【0030】電源66は、環状巻線52を構成する導体64の2端64a、64bの両端に接続される。電源66は、直流電源、交流電源、又はRF電源（例えば、R

F周波数1.3、56MHz)でもよい。電源56が印加する電流は、好ましくは、天井20のすぐ下で約500ガウスの磁界強度を提供するように調整される。

【0031】図2(a)と図2(b)では、円環型電磁石60が、円環体の回転対称軸に調心され、中心の孔を取り囲む。図2(a)及び図2(b)の実施形態の趣意の特徴によれば、孔の中心に小型の磁石68を配置することもできる。小型磁石68は、円環型電磁石60の対称軸の回りに巻かれた導電性コイル巻線70を有する電磁石であることが好ましい。巻線62、70のそれぞれに電流が流れる向きは、巻線62、70それぞれが作る磁界が互いに強め合う向きである。巻線62の電流が時計回りの向き(図2(a)の図を上から見て)ならば、巻線70内の電流も時計回りの向きである。この場合(いわゆる「右手」の法則を使う)は、図2(a)のMERIE磁界線は、天井20の下で外周又は外縁から中心の方に向かって流れ、次いで、円環型電磁石60の中心の孔を通過して上方に流れる。

【0032】図2(a)及び図2(b)の実施形態の趣意の特徴によれば、電磁石60の磁界の強さは、ウエハ表面に沿った固有のエッチレイトの不均一性を補償するため、半径の関数として変化する。例えば、この不均一性が、エッチレイトがウエハ表面の中心から半径方向に小さくなるような不均一性である場合は、円環型電磁石60に沿って半径方向に増大するような磁界強度の不均一な分布を作ることにより、この不均一性を補償することができる。具体的には、これは、半径方向の単位長さ当たりの巻線62の数を半径の関数で増やすことによって実施され、そのため、円環型電磁石60の外周外縁に沿ってより多くの巻線の数が与えられる。電磁石60の半径単位長さ当たりの巻線数は、エッチレイトの内在的な不均一性を補償するために変更することもできる。

【0033】図3(a)の具体例では、天井20が、電磁石60の下で天井電極80と置き換えられている。天井電極80は、非磁性体の導電性材料(アルミニウムなど)の薄い層で形成される。図3(a)及び図3(b)の実施形態の1つの方法は、ベDESTAL12と天井電極80の間にRF電源18を接続することである。天井電極80は、円筒形の側壁22などのチャンバ10の接地された面から電気的に絶縁されていることが好ましい。

【0034】図3(b)は、図3(a)の具体例を実施するもう1つの方法を示し、Hong-Ching Shan(ホンチンシャン)によって出願された標題「Broad-Band Adjustable Power Ratio Phase-Inverting Plasma Reactor」(広帯域可調整電力比位相反転プラズマリアクタ)である米国特許出願第08/、号に開示された発明を利用する。本実施形態では、RF電源18が、コイルインダクタ82の両端と、ベDESTAL12と天井電極80に接続される。コイルインダクタ82は、インダクタ82

に沿った位置によってベDESTAL12と天井電極80の間のRF電力の配分を決定する可動接地タップ84を有する。ウエハベDESTAL12へ印加される電力は大きく天井電極80へ印加される電力は小さい事が好ましい。このため、接地タップ84は、天井電極80への接続に近い位置で、またウエハベDESTAL12への接続から遠い位置で、コイルインダクタ82上の巻線と接触するように位置決めされる。上記特許出願に開示されているように、コイルインダクタ82のそれぞれの端には、一對のキャパシタ86a、86bが直列に接続され、コイルインダクタ82の両端に接続された可変キャパシタ88によってインピーダンス整合を行うことができる。

【0035】図4(a)及び図4(b)は、図1(a)、図1(b)、図2(a)、図2(b)、図3(a)及び図3(b)の実施形態によって享受された利点を提供する本発明のもう1つの実施形態を示す。図4(a)及び図4(b)の実施形態において、半径方向に対称的なMERIE磁界は、それぞれが円形天井20のそれぞれの端に沿って配置された複数のスポーク状磁石90によって与えられる。スポーク状磁石90は、永久磁石でも電磁石でもよい。スポーク状磁石が電磁石の場合、それらは、図4(b)に示したように、放射状のそれぞれの対称軸の回りに巻かれた導体コイル92を有している。コイル92それぞれの2つの端部は、電源56の両端に接続される。電源56は、直流電源でも交流電源でもRF電源でもよい。

【0036】一般に、本発明によって、天井20の上に、半径方向に対称的な永久磁石又は電磁石のマトリクス又はアレイが配置される。例えば、図5に示すように、半径方向に対称的な磁石のアレイ100が天井20を覆う。

【0037】本発明がエッチレイトを大幅に改善することは、電磁石60あるいは従来のプラズマリアクタチャンバの代わりに永久磁石を用いて図2(a)及び図2(b)の例を実施した実験によって証明された。永久磁石がない場合は、8インチウエハ上の二酸化珪素のエッチレイトは、毎分4500オングストロームであった。次に、永久磁石をリアクタチャンバの天井の上に配置したとき、エッチレイトは、同じプロセスパラメータ(RF電力レベル、周波数、チャンバ圧力、プロセスガス流量、及び温度)で毎分8000オングストロームであった。

【0038】本発明を、好ましい実施形態を特に参照して詳細に説明したが、本発明の真の趣旨及び範囲から逸脱せずに変形及び修正を行うことができることを理解されたい。

【図面の簡単な説明】

【図1】(a)は、リアクタの天井近くで環状永久磁石を利用する本発明の第1の実施形態のプラズマリアクタの横断面図である。(b)は、図1(a)に対応する上

面図である。

【図2】(a)は、リアクタの天井近くでトロイダル電磁石を利用する本発明の第2の実施形態のプラズマリアクタの横断面図である。(b)は、図2(a)に対応する斜視上面図である。

【図3】(a)は、リアクタの天井近くに更に電極を有する図2Aに対応する実施形態の横断面図である。

(b)は、図3(a)の例の実施形態の回路図である。

【図4】(a)は、リアクタの天井近くで複数の放射状棒磁石を利用する本発明の第3の実施形態のプラズマリアクタの上面図である。(b)は、永久磁石の代わりに電磁石を利用すること以外は図4(a)と同様の実施形態の上面図である。

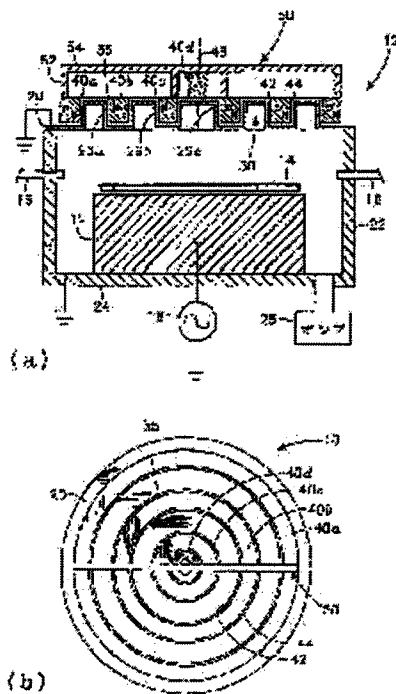
【図5】リアクタチャンバの天井の上方で、半径方向に

対称の独立した磁石のマトリクスアレイを利用する本発明の実施形態の上面図である。

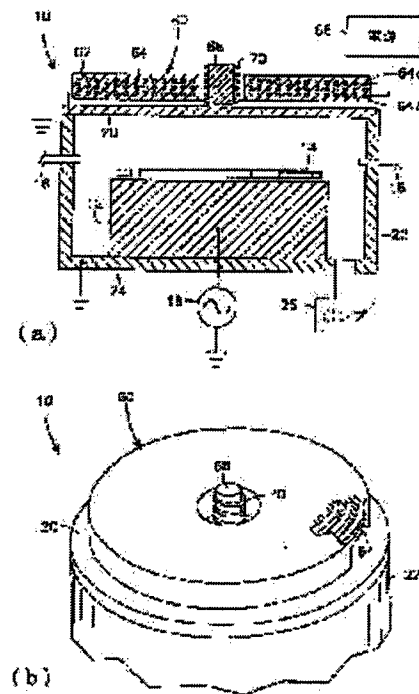
【符号の説明】

10…チャンバ、12…ベDESTAL、16…ガス流入口、18…電源、20…天井、22…側壁、24…底面、25…真空ポンプ、26…天井ひた、30…内側環状チャンネル、35…外側環状チャンネル、40…リング磁石、42…内周、44…外周、46…対称軸、50…ヨーク、52…垂直部材、54…水平部材、60…円環型電磁石、62…環状巻線、64…磁体、66…電源、68…磁石、70…巻線、80…天井電極、82…コイルインダクタ、84…可動接地タップ、86…キャパシタ、88…可変キャパシタ、90…スポーク状磁石、92…磁体コイル、100…磁石のアレイ。

【図1】

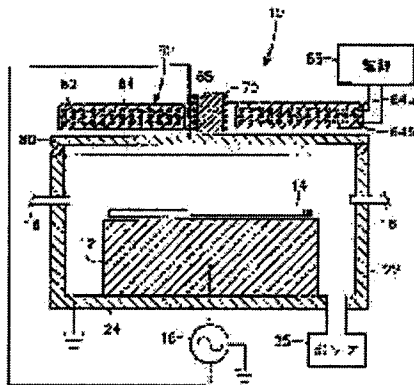


【図2】

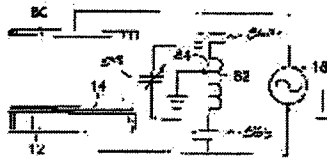




【図3】

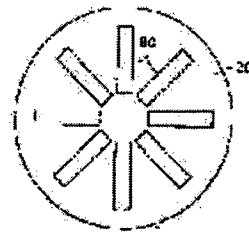


(a)

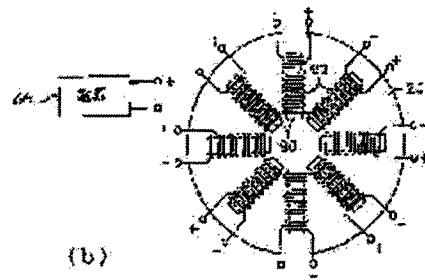


(b)

【図4】

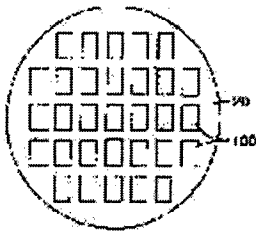


(a)



(b)

【図5】



フロントページの続き

(72)発明者 ブライアン プー  
アメリカ合衆国、カリフォルニア州、  
サン ノゼ、 エヌ、 キング ロード  
750 ナンバー509

(72)発明者 ジェディン  
アメリカ合衆国、カリフォルニア州、  
キャンプベル、 ハシェンダ アヴェニュー  
- 595、 ナンバー103

(72)発明者 マイケル ウェルチ  
アメリカ合衆国、カリフォルニア州、  
リヴァーモア、ローマ ストリート  
940

1. Title of Invention

SHALLOW MAGNETIC FIELDS FOR GENERATING CIRCULATING  
ELECTRONS TO ENHANCE PLASMA PROCESSING

2. Claims

1. A plasma reactor for processing a workpiece,  
comprising:  
a reactor chamber including a ceiling;  
a pedestal for supporting said workpiece within  
said chamber under said ceiling;  
a processing gas supply inlet into said chamber;  
an RF plasma power source coupled to said  
pedestal; and  
a magnetic field source near said ceiling  
providing a radially symmetrical magnetic field relative to  
an axis of symmetry of said chamber within a portion of said  
chamber near said ceiling.

2. The reactor of Claim 1 wherein said magnetic field  
source comprises plural magnets disposed over said ceiling  
in a radially symmetrical fashion with respect to said axis  
of symmetry.

3. The reactor of Claim 2 wherein said plural  
comprises one of: (a) permanent magnets, (b) electromagnets.

4. The reactor of Claim 2 wherein said radially  
symmetrical magnetic field penetrates from said ceiling into  
said chamber to a shallow depth, and wherein the height of  
said ceiling above said workpiece exceeds said depth.

5. The reactor of Claim 2 wherein said plural magnets  
comprise plural ring magnets over said ceiling and centered  
at said axis of symmetry.

6. The reactor of Claim 5 wherein said magnetic source further comprises a bar magnet disposed over said ceiling and on said axis of symmetry and having a magnetic field which contributes constructively to the field produced by said plural ring magnets.

7. The reactor of Claim 6 wherein said ring magnets and said bar magnet are permanent magnets.

8. The reactor of Claim 2 wherein said plural magnets comprise plural spoke magnets aligned with respective radii centered at said axis of symmetry.

9. The reactor of Claim 8 wherein said plural spoke magnets are permanent magnets.

10. The reactor of Claim 8 wherein said plural spoke magnets are electromagnets.

11. The reactor of Claim 1 wherein said magnetic field source comprises an electromagnet.

12. The reactor of Claim 11 wherein said electromagnet comprises plural windings formed of a single conductor path and disposed in radially symmetrical fashion with respect to said axis of symmetry of said pedestal, said conductor path having two ends for receiving an electrical current.

13. The reactor of Claim 12 wherein said plural windings of said electromagnet are confined within a torus having a center hole.

14. The reactor of Claim 13 wherein said magnetic source further comprises a center magnet over said ceiling and lying within said center hole of said torus of said electromagnet, said center magnet having a magnetic field which contributes constructively to the magnetic field of

said electromagnet.

15. The reactor of Claim 14 wherein said center magnet comprises a coil inductor comprising a winding wound in the same rotational direction as said winding of said electromagnet.

16. The reactor of Claim 12 wherein said electrical current is one of: (a) a D.C. current, (b) an A.C. current and (c) an RF current.

17. The reactor of Claim 1 wherein said ceiling comprises a ceiling electrode, said RF power source being connected across said pedestal and said ceiling electrode.

18. The reactor of Claim 17 further comprising a circuit for apportioning power from said RF power source between said pedestal and said ceiling electrode.

19. The reactor of Claim 18 wherein said circuit comprises a coil inductor connected across said RF power source and a movable ground tap connecting a selected winding of said coil inductor to ground.

20. The reactor of Claim 2 wherein said ceiling has plural corrugations therein forming plural internal channels and external channels and wherein said plural magnets are disposed in said plural external channels, at least a portion of said processing gas being in said internal channels.

21. The reactor of Claim 20 wherein said plural magnets each have a pair of opposite magnetic poles and wherein opposite poles of magnets adjacent a common internal channel face one another across said internal channel.

whereby to form generally straight magnetic field lines across said internal channels.

22. The reactor of Claim 5 wherein said ceiling has plural annular corrugations therein forming plural internal annular channels and external annular channels and wherein said plural ring magnets are disposed in said plural external annular channels, at least a portion of said processing gas being in said internal annular channels.

10

23. The reactor of Claim 22 wherein said plural ring magnets each have a pair of opposite magnetic poles on opposite circumferential surfaces thereof and wherein opposite poles of ring magnets adjacent a common internal channel face one another across said internal channel whereby to form generally straight magnetic field lines across said internal channels.

15

24. The reactor of Claim 1 wherein said radially symmetrical magnetic field has a field strength varying with the radial position in said chamber.

20

25. The reactor of Claim 5 wherein said ring magnets have differing field strengths in accordance with a predetermined progression of field strengths.

25

26. The reactor of Claim 25 wherein said field strengths of said plural ring magnets are a function of radial position.

30

27. The reactor of Claim 13 wherein the density of said windings is a function of their radial position within said torus.

35

28. The reactor of Claim 27 wherein said function

increases with radius whereby to provide a greater density of windings near the outer circumference of said torus.

29. The reactor of Claim 5 further comprising a magnetic yoke connected to one magnetic pole of a radially innermost one of said plural magnets and an opposite magnetic pole of a radially outermost one of said plural magnets.

30. A plasma reactor for processing a workpiece having an axis of symmetry, said reactor comprising:  
a reactor chamber including a ceiling;  
a pedestal for supporting said workpiece within said chamber under said ceiling;  
a processing gas supply inlet into said chamber;  
an RF plasma power source coupled to said pedestal; and  
a magnetic field source near said ceiling providing a radially symmetrical magnetic field relative to said axis of symmetry within a portion of said chamber near said ceiling.

31. The reactor of Claim 30 wherein said workpiece is disk shaped and has an axis of symmetry extending vertically therethrough.

32. The reactor of Claim 30 wherein said magnetic field source comprises plural magnets disposed over said ceiling in a radially symmetrical fashion with respect to said axis of symmetry.

33. The reactor of Claim 32 wherein said plural comprises one of: (a) permanent magnets, (b) electromagnets.

34. The reactor of Claim 32 wherein said radially symmetrical magnetic field penetrates from said ceiling into said chamber to a shallow depth, and wherein the height of said ceiling above said workpiece exceeds said depth.

5



### 3. Detailed Description of Invention

#### BACKGROUND OF THE INVENTION

##### 10 Technical Field:

The invention concerns a magnetically enhanced reactive  
 15 for etch (MERIE) plasma reactor and specifically an MERIE  
 plasma reactor having a shallow magnetic field with minimal  
 strength at the wafer surface and with radial symmetry  
 across the wafer surface.

##### Background Art:

A plasma reactor for processing a substrate such as a  
 semiconductor wafer typically includes a reactor chamber  
 20 containing a processing gas and a pedestal supporting the  
 wafer within the chamber. In order to ignite a plasma by  
 ionizing the processing gas, a radio frequency (RF) power  
 source is applied to the wafer pedestal. The RF power  
 coupled into the chamber ignites and maintains a plasma  
 25 while also attracting ions toward the wafer pedestal. The  
 RF power excites the electrons in the chamber by reason of  
 their high charge-to-mass ratio, and the excited electrons  
 collide with neutral species (e.g., molecules and radicals)  
 of the processing gas to create ions. The ions react with  
 30 the wafer on the pedestal to etch certain thin films  
 thereon. For example, while some ion-wafer collisions cause  
 ion bombardment or sputtering damage on the wafer surface,  
 depending upon the energy with which the ions collide with  
 the wafer surface. The ion energy is determined by the RF  
 35 power applied to the wafer pedestal.

A fundamental limitation of such a plasma reactor is

that there is a tradeoff between the plasma density and the ion bombardment damage on the wafer. This is because in order to increase the plasma ion density in the chamber, the RF power applied to the wafer pedestal must be increased, which in turn increases the ion energy at the wafer surface, thereby increasing ion bombardment damage. This tradeoff limits the performance of a plasma reactor. In a plasma reactor which performs a plasma etch process, the processing gas is an etchant such as  $\text{HF}$ ,  $\text{CF}_3$ , or  $\text{CF}_6$ , for example, and the etch rate is determined in large part by the density of fluorine-containing ions, which in turn is limited by constraining the RF power applied to the wafer pedestal to avoid excessive ion bombardment damage to the wafer.

Another problem is that increasing the RF power (in order to increase plasma ion density) increases sputtering of the chamber ceiling and walls. Such increased sputtering of the chamber ceiling and walls increases the amount of sputtered material introduced into the chamber and onto the wafer which can interfere with the etch process. For example, if the ceiling is quartz and the process being performed on the wafer is a silicon dioxide etch process, then some fraction of the quartz sputtered from the ceiling deposits onto the wafer surface and competes with the etch process, thereby reducing the etch rate. Also, unless the ceiling is of a material compatible with the particular etch being carried out on the wafer (e.g., a silicon dioxide or quartz ceiling for a silicon dioxide etch process, or an aluminum ceiling for an aluminum etch process), then the ceiling material sputtered into the chamber contaminates the wafer. (Sputtering of the ceiling also consumes an expensive component of the chamber). As another example, if the processing gas includes  $\text{CF}_3$  or  $\text{CF}_6$ , the polymer material formed therefrom on the interior ceiling surface may be sputtered onto the wafer surface, thereby contaminating

microelectronic devices on the wafer surface.

One technique for enhancing the plasma ion density in a plasma etch process without necessarily increasing ion bombardment damage on the wafer and sputtering is magnetically enhanced reactive ion etching (MERIE). In this technique, the plasma reactor described above is improved by the addition of plural (typically four) ring magnets placed symmetrically around the sides of the chamber. Typically, the diameter of each magnet is on the order of the height of the reactor chamber. The MERIE magnetic field produced within the chamber by these magnets causes the electrons -- due to their large charge-to-mass ratio -- to assume a complex circular and spiral motion in addition to their vertical linear motion induced by the RF power applied to the wafer pedestal. The circular and spiral motion of the electrons induced by the MERIE magnetic field increases the ionizing collisions by the electrons, thereby increasing the plasma ion density. The result is that ion density -- and therefore the etch rate -- is increased. However, there is no proportionate increase in ion bombardment damage on the wafer because the RF power applied to the wafer pedestal is not increased. Moreover, any spiral motion of the ions induced by the MERIE magnetic field does not directly increase the ion-wafer collision energy.

The ion-wafer collision energy is not proportionately increased by the MERIE magnetic field because any spiral motion of the ions induced by the MERIE magnetic field is generally in a horizontal plane (parallel to the wafer surface).

One problem with such MERIE techniques is that the magnetic field within the chamber is necessarily discontinuous because it is produced by (four) discrete

adjacent magnets. The plasma ions tend to be focused into "corner" areas between the magnets, thus producing non-uniform etch rates across the wafer surface, a significant disadvantage. Further, it has been generally found that the plasma ions tend to migrate toward the wafer edge and away from the wafer center, thus contributing to the non-uniformity in etch rate across the wafer surface. Often, the etch rate tends to vary greatly along a given radius of the wafer, the etch rate on the wafer increasing with the radius.

This problem of non-uniform etch rate has been ameliorated in MERIE plasma reactors by rotating the magnetic field produced by the plural (four) magnets placed around the side of the chamber. Typically, such rotation is achieved by employing electromagnets around the sides of the chamber and applying RF signals in the magnet windings, a sine wave RF signal being applied to the windings of alternate ones of the magnets and a cosine wave RF signal of the same frequency being applied to the windings of the remaining ones of the magnets, for example. The idea is that the rotation of the magnetic field within the chamber across the wafer surface disperses corner effects and reduces ion focusing and thereby reduces plasma ion non-uniformity across the wafer surface, thus providing a partial solution to the problem.

However, this solution raises two additional problems. First, the rotation of the MERIE magnetic field must be limited to below ten Hertz to avoid excessive heating of the chamber side walls, thus limiting its efficacy. Second, the rotation of the MERIE magnetic field across the wafer surface produces charge damage in the microelectronic semiconductor structures already fabricated on the wafer surface. For example, thin gate oxide layers are

particularly susceptible to breakdown. Such breakdown occurs because the changing magnetic field across the wafer surface produces relatively large forces on charges already accumulated in such microelectronic structures during plasma processing in the reactor.

Even without rotation of the magnetic field there is a risk of charge damage to microelectronic structures simply because the magnetic field itself is non-uniform across the wafer surface, leading to non-uniform plasma ion and electron density across the wafer surface. Such non-uniform plasma ion and electron distribution across the wafer surface leads to non-uniform charge accumulation and electrical potential differences across the wafer surface. Such potential differences can be sufficient to break down the more susceptible features (e.g., thin gate oxide layers) of the microelectronic structures on the wafer. Accordingly, the inventors herein recognize that the presence of the MERIE magnetic field at the wafer surface is itself a problem which limits the performance of MERIE reactors.

Therefore, it is an object of the present invention to provide an MERIE magnetic field which is of a minimum strength at the wafer surface and of maximum strength elsewhere in the reactor chamber.

It is another object of the present invention to provide an MERIE magnetic field which has improved uniformity across the wafer surface.

It is a related object of the present invention to provide an MERIE magnetic field which has radial symmetry across the wafer surface.

#### SUMMARY OF THE DISCLOSURE

The present invention is embodied in a plasma reactor for processing a workpiece such as a semiconductor wafer having an axis of symmetry, the reactor including a reactor chamber with a ceiling, a pedestal for supporting the workpiece within the chamber under the ceiling, a processing gas supply inlet into the chamber, an RF plasma power source coupled to the pedestal, and a magnetic field source near the ceiling providing a radially symmetrical magnetic field relative to the axis of symmetry within a portion of the chamber near the ceiling. The magnetic field source can include an electromagnet or plural magnets disposed over the ceiling in a radially symmetrical fashion with respect to the axis of symmetry. The plural magnets may be permanent magnets or electromagnets. The radially symmetrical magnetic field penetrates from the ceiling into the chamber to a shallow depth, and the height of the ceiling above the workpiece exceeds the depth.

The plural magnets may be plural ring magnets over the ceiling and centered at the axis of symmetry. The ring magnets may be supplemented by a bar magnet disposed over the ceiling and on the axis of symmetry and having a magnetic field which contributes constructively to the field produced by the plural ring magnets. Alternatively, the plural magnets may be plural spoke magnets aligned with respective radii centered at the axis of symmetry.

If the magnetic source is an electromagnet, then it may include plural windings formed of a single conductor path and disposed in radially symmetrical fashion with respect to the axis of symmetry, the conductor path having two ends for receiving an electrical current. The plural windings may be confined within a torus having a center hole.

# DETAILED DESCRIPTION OF THE PREFERRED EMBODIMENTS

Referring to FIGS. 1A and 1B, an MERIE plasma reactor includes a chamber 10 having a pedestal 12 for supporting a workpiece 14 such as a semiconductor wafer within the chamber. Gas inlets 16 supply a processing gas (such as an etchant gas) into the interior of the chamber 10. An RF power source 18 connected between the pedestal 12 and ground provides sufficient power to ionize the processing gas within the chamber to provide and maintain a plasma therein. The power source 18 includes conventional impedance matching circuitry for maintaining an impedance match between output impedance of the power source 18 and the load impedance presented by the plasma in the chamber. The chamber 10 is enclosed by a round ceiling 20 made of aluminum, silicon or quartz, a cylindrical aluminum side wall 22 and a floor 24. Typically, the ceiling 20 and side wall 22 of the chamber 10 are grounded. A vacuum pump 26 controls the pressure inside the chamber 10.

In accordance with the invention, the ceiling 20 has annular concentric ceiling corrugations 26a, 26b, 26c therein. Each ceiling corrugation 26 defines an internal annular channel 30 inside the chamber 10 flanked by a pair of external annular channels 32 outside of the chamber 10. The processing gas and plasma fills the interior of the chamber 10 including the interior annular channels 30. For this purpose, the processing gas inlets 16 may be located either along the cylindrical side wall 22 (as shown in the drawing) or at the top of each interior annular channel 30.

Ring magnets 40a, 40b, 40c outside of the chamber 10 rest within respective external annular channels 32. Each magnet 40 is magnetized such that its inner circumference 42 constitutes one pole of the magnet (e.g., the south pole) while its outer circumference 44 constitutes the opposite pole of the magnet (e.g., the north pole). As indicated in

FIG. 1a, each interior annular channel 30 lies between opposite magnetic poles so that magnetic field lines extend approximately radially through each interior annular channel 30 relative to the axis of symmetry 46 of the cylindrical chamber 10.

A center magnet 40d overlies the center corrugation 26c in the center of the ceiling 20. The north pole of the center magnet 40d is adjacent the top of the center corrugation 26c while the south pole of the center bar magnet 40d faces away from the ceiling 20.

In accordance with an optional feature of the invention, a yoke 50 of a magnetic material (such as iron) may be connected to one pole (e.g., the south pole) of the innermost magnets (e.g., the south poles of the center magnet 40d and the innermost ring magnet 40c) and to the opposite pole (e.g., the north pole) of the outermost ring magnet 40a. An advantage of the yoke 50 is that it better confines the MERIE field produced by the magnets 40 away from the wafer pedestal 12. The yoke 50 includes vertical members 52 connected to, respectively, the south poles of the center magnet 40d and the innermost ring magnet 40c and to the north pole of the outermost ring magnet 40a and a horizontal member 54 connected to all of the vertical members 52.

As electrons of the plasma inside the interior annular channels 30 are accelerated in a generally vertical direction (between the pedestal 12 and ceiling 20) by the RF power applied to the wafer pedestal 12, the MERIE magnetic field extending horizontally across each interior annular channel 30 causes the electrons to execute a spiral motion about a generally vertical axis. This additional (spiral) motion of the electrons produces a greater number of



ionizing collisions with neutral particles (molecules, radicals) of the processing gas, thereby enhancing plasma ion production within the interior annular channels 30 inside the chamber 10. This enhances the plasma ion density throughout the chamber 10 without any increase in the power of the RF source 18 and therefore without a proportional increase in ion bombardment damage on the wafer.

If the processing gas inside the chamber 10 includes an etchant such as fluorine, this ionization process produces fluorine ions and radicals which react with and etch certain materials on the wafer surface (such as silicon bulk, polysilicon layers or silicon dioxide layers, for example). In such an etch process, the greater plasma ion density provides a greater etch rate without proportionately greater ion bombardment damage on the wafer.

One advantage the MERIE reactor of FIGS. 1A and 1B provides over conventional MERIE reactors is that the magnetic field has far greater uniformity and is in fact radially symmetrical. This is due to the ring-like shape of the magnets 40. As a result, there are virtually no corners in the magnetic field to focus electrons or ions near the wafer surface, so that plasma ion density is more uniform. This greater uniformity of the plasma ion density provides far greater uniformity in etch rate across the wafer surface, a significant advantage. Another advantage of such increased uniformity is that it reduces electric charge accumulation and charge damage or breakdown damage (in microelectronic structures on the wafer) of the type caused in conventional MERIE plasma reactors by corners in the magnetic field or focusing of ions or electrons.

Another advantage of the MERIE reactor of FIGS. 1A and 1B is that the MERIE magnetic field produced by the plural

ring magnets 40 is generally restricted to the interior annular channels 30 and falls off so rapidly away from the ceiling 20 (approximately as the square of the distance) that there is little or no magnetic field at the wafer. Therefore, whatever non-uniformities that may exist in the magnetic field have little or no direct effect at the wafer surface. This reduces any magnetic field corner effects and charge focusing at the wafer surface, which in turn reduces charge accumulation and charge damage in microelectronic structures at the wafer surface.

For a given plasma ion density, the RF power applied to the wafer pedestal 12 may be decreased with the introduction of the magnets 40, since the MERIB magnetic field produced by these magnets enhances the plasma ion density. As a result, there is less sputtering of the chamber ceiling and walls. One advantage is that the reduction in sputtering of the chamber ceiling and walls reduces the amount of sputtered material introduced into the chamber 10 and onto the wafer which can interfere with the etch process. For example, if the ceiling is quartz and the process being performed on the wafer is a silicon dioxide etch process, then some fraction of the quartz sputtered from the ceiling deposits onto the wafer surface and competes with the etch process, thereby reducing the etch rate. Also, unless the ceiling is of a material compatible with the particular etch being carried out on the wafer (e.g., a silicon dioxide or quartz ceiling for a silicon dioxide etch process, or an aluminum ceiling for an aluminum etch process), then the ceiling material sputtered into the chamber contaminates the wafer. (Sputtering of the ceiling also consumes an expensive component of the chamber 10). As another example, if the processing gas includes  $CF_4$  or  $CF_3$ , the polymer material formed therefrom on the interior ceiling surface may be sputtered onto the wafer surface, thereby

contaminating microelectronic devices on the wafer surface. These problems are solved in the present invention with the reduction in ion energy for a given plasma ion density.

A further advantage of the embodiment of FIGS. 1A and 1B is that the chamber operating pressure has a much wider range (1-350 Mtorr) than inductively coupled plasma reactors (whose pressure range is generally restricted to 5-20 Mtorr).

In accordance with one implementation of the embodiment of FIGS. 1A and 1B for processing an 8-inch (20 cm) diameter semiconductor wafer, the wafer pedestal has a diameter of about 8 inches (20 cm), the chamber has a diameter of about 12 inches (30 cm) and the outside diameters of the three ring magnets 40a, 40b, 40c are (from the outermost one) as follows: 8 inches (20 cm), 6 inches (15 cm) and 4 inches (10 cm), while the outer diameter of the center magnet 40d is about 2 inches (5 cm). The height of each interior annular channel 30 is on the order of about 1 inch (2.5 cm) and the width of each interior annular channel 30 is also on the order of about 1 inch (2.5 cm). The width of each exterior annular channel 35 is on the order of about 1 inch (2.5 cm). Each ring magnet 40 has an annular width of about 1 inch or less so that it fits within the respective exterior annular channel 35. The field strength of each magnet 40 is on the order of about 500 Gauss. In this implementation, the RF power applied to the wafer pedestal 12 is about 1000 Watts at 13.56 MHz and the processing gas (HF) flow rate was \_\_\_ at a chamber pressure of about \_\_\_ Mtorr.

In accordance with an optional feature of this embodiment, the field strengths of the respective magnets 40 may differ in accordance with a progression from one to the

next which compensates for an inherent etch rate nonuniformity along the wafer surface. For example, if the nonuniformity is such that the etch rate increases with radius from the center of the wafer surface, then the nonuniformity may be compensated by establishing a progression of magnetic field strengths of the magnets 40 in which the center magnet 40d has the maximum field strength (e.g., about 500 Gauss), the innermost ring magnet 40c has a medium field strength (e.g., about 450 Gauss), the intermediate ring magnet 40b has a lesser field strength (e.g., about 400 Gauss), and the outermost ring magnet 40a has the least field strength (e.g., about 350 Gauss). Depending upon the etch rate nonuniformity to be compensated, this progression may be reversed so that the magnets 40 increase in strength away from the center of the ceiling 20.

FIGS. 2A and 2B illustrate another embodiment which enjoys the advantages of the embodiment of FIGS. 1A and 1B, but with an additional advantage that the strength of the MERIE magnetic field may be varied or turned off as desired. In the embodiment of FIGS. 2A and 2B, an MERIE magnetic having radial symmetry is provided by a torus-shaped electro-magnet 60 constituting an annular winding 62 of about 40 turns of a single continuous conductor 64 lying on top of the ceiling 20 in a plane parallel to that of the ceiling. In the embodiment of FIGS. 1A and 1B, the ceiling 20 can be planar. As described previously herein, radial symmetry of the MERIE magnetic field reduces or eliminates magnetic field corners and ion/electron focussing at the wafer surface. The MERIE magnetic field of the embodiment of FIGS. 2A and 2B is relatively shallow (as in the embodiment of FIGS. 1A and 1B) so that the wafer is beyond the effective range of the MERIE magnetic field, thereby preventing any ion focussing at the wafer surface and any

charge damage to devices on the wafer surface.

A current source 66 is connected across the two ends 64a, 64b of the conductor 64 constituting the annular windings 62. The current source 66 may be a D.C. current source, an A.C. current source or RF current source (e.g., of RF frequency 13.56 Mhz). The electrical current applied by the current source 66 is preferably adjusted to provide a magnetic field strength of about 500 Gauss immediately below the ceiling 20.

In FIGS. 2A and 2B, the torus-shaped electromagnet 60 surrounds a center hole aligned with the rotational axis of symmetry of the torus. In accordance with an optional feature of the embodiment of FIGS. 2A and 2B, a small magnet 68 may be placed in the center of the hole. Preferably, the small magnet 68 is an electromagnet including a conductive coil winding 70 wound about the axis of symmetry of the torus-shaped electromagnet 60. The direction of current flow in the respective windings 62, 70 is such that the magnetic fields produced the respective windings 62, 70 enhance one another. For example, if current flow in the winding 62 is clockwise (looking down in the drawing of FIG. 2A) then current flow in the winding 70 is also clockwise. In this case (using the so-called "right-hand" rule), the MERIE magnetic field lines in FIG. 2A flow under the ceiling 20 from the outer circumference or perimeter toward the center and then upwardly through the center hole of the torus shaped electromagnet 60.

In accordance with an optional feature of the embodiment of FIGS. 2A and 2B, the field strength of the electromagnet 60 varies as a function of radius to compensate for any inherent etch rate nonuniformity along the wafer surface. For example, if the nonuniformity is

such that the etch rate decreases with radius from the center of the wafer surface, then the nonuniformity may be compensated by establishing a non-uniform distribution of magnetic field strengths which increases with radius along the torus-shaped electromagnet 60. Specifically, this is accomplished by increasing the number of windings 62 per unit of radial length as a function of radius, so that a larger number of windings is provided along the circumferential perimeter of the torus-shaped electromagnet 60. The number of windings per unit radial length of the electromagnet 60 may be varied in any fashion to compensate for any inherent non-uniformity in etch rate.

In the embodiment of FIG. 3A, the ceiling 20 is replaced by a ceiling electrode 80 under the electromagnet 60. The ceiling electrode 80 is formed of a thin layer of non-magnetic conductive material (such as aluminum). One way of implementing the embodiment of FIGS. 3A and 3E is to connect the RF source 16 across the pedestal 12 and the ceiling electrode 80. Preferably, the ceiling electrode 80 is electrically insulated from any grounded surfaces of the chamber 10 such as the cylindrical side wall 22.

FIG. 3B illustrates another way of implementing the embodiment of FIG. 3A using the invention disclosed in U.S. Patent Application Serial No. 08/ , filed by Hong Ching Shun et al. entitled "Broad-Band Adjustable Power Ratio Phase-Inverting Plasma Reactor". In this implementation, the RF source 16 is connected across a coil inductor 82 and across the pedestal 12 and the ceiling electrode 80. The coil inductor 82 has a movable ground tap 84 whose position along the inductor 82 determines the apportionment of RF power between the pedestal 12 and the ceiling electrode 80. Preferably, the greater portion of power is applied to the wafer pedestal 12 while a lesser

portion is applied to the ceiling electrode 80. For this purpose, the ground tap 84 is positioned to contact a winding on the coil inductor 82 closer to the connection to the ceiling electrode 80 and further from the connection to the wafer pedestal 12. A pair of capacitors 86a, 86b are connected in series with respective ends of the coil inductor 82, while a variable capacitor 88 connected across the coil inductor 82 can provide impedance matching, as disclosed in the above-cited patent application.

FIGS. 4A and 4B illustrate another embodiment of the invention providing the advantages enjoyed by the embodiments of FIGS. 1A, 1B, 2A, 2B, 3A and 3B. In the embodiment of FIGS. 4A and 4B, a radially symmetrical MERIE magnetic field is provided by plural spoke magnets 90 each lying along respective radii of the circular ceiling 20. The spoke magnets 90 may be permanent magnets or electromagnets. If the spoke magnets are electromagnets, then they comprise conductive coils 92 each wound around a respective radial axis of symmetry, as shown in FIG. 4B. The two ends of each coil 92 are connected across the current source 66. The current source 66 may be a D.C. current source, an A.C. current source or an RF current source.

In general, any radially symmetrical matrix or array of permanent magnets or electromagnets may be placed over the ceiling 20 in accordance with the present invention. For example, as illustrated in FIG. 5 a radially symmetrical array of magnets 100 covers the ceiling 20.

That the present invention provides dramatically improved etch rates was proven in an experiment in which the embodiment of FIGS. 2A and 2B was implemented using a permanent magnet in lieu of the electromagnet 52 and an

otherwise conventional plasma reactor chamber. Without the permanent magnet, the etch rate of silicon dioxide on an 8-inch wafer was 4500 angstroms per minute. Then, when the permanent magnet was placed over the reactor chamber during, the etch rate was 8000 angstroms per minute for the same processing parameters (RF power level and frequency, chamber pressure, processing gas flow rate and temperature).

While the invention has been described in detail by specific reference to preferred embodiments, it is understood that variations and modifications thereof may be made without departing from the true spirit and scope of the invention.



#### 4. Brief Description of Drawings

FIG. 1A is a cut-away side view of a plasma reactor of a first embodiment of the invention employing permanent ring magnets near the reactor ceiling.

FIG. 1B is a top view corresponding to FIG. 1A.

FIG. 2A is a cut-away side view of a plasma reactor of a second embodiment of the invention employing a toroidal electromagnet near the reactor ceiling.

FIG. 2B is a perspective top view corresponding to FIG. 2A.

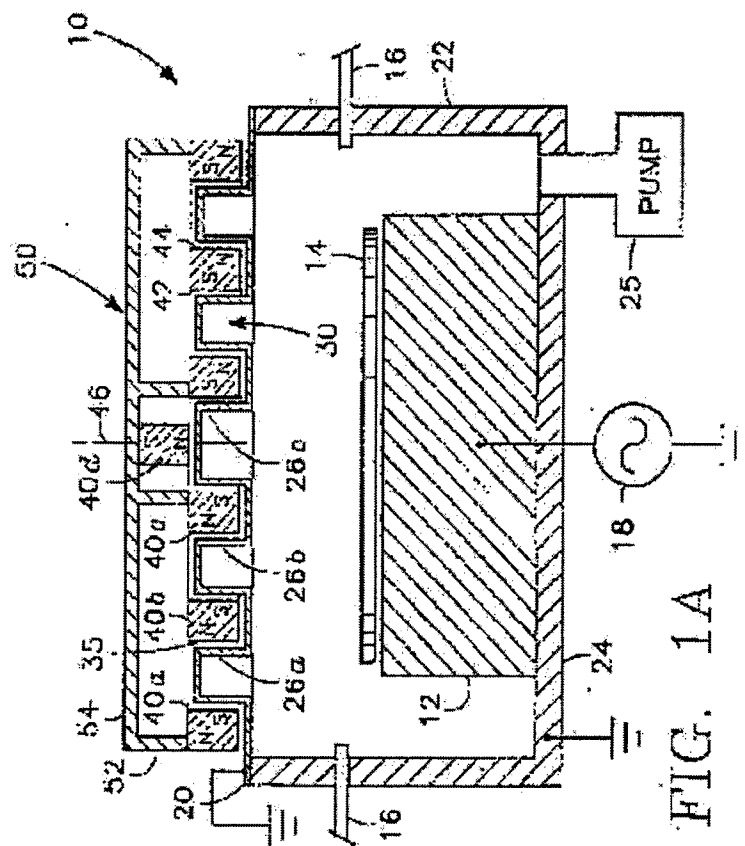
FIG. 3A is a cut-away side view of an embodiment corresponding to FIG. 2A having, in addition, an electrode near the reactor ceiling.

FIG. 3B is schematic diagram of one implementation of the embodiment of FIG. 3A.

FIG. 4A is top view of a plasma reactor of a third embodiment of the invention employing plural radial magnet bars near the reactor ceiling.

FIG. 4B is a top view of an embodiment similar to that of FIG. 4A but employing electromagnets in lieu of permanent magnets.

FIG. 5 is a top view of an embodiment of the invention employing a radially symmetrical matrix array of individual magnets over the reactor chamber ceiling.



【図 D】

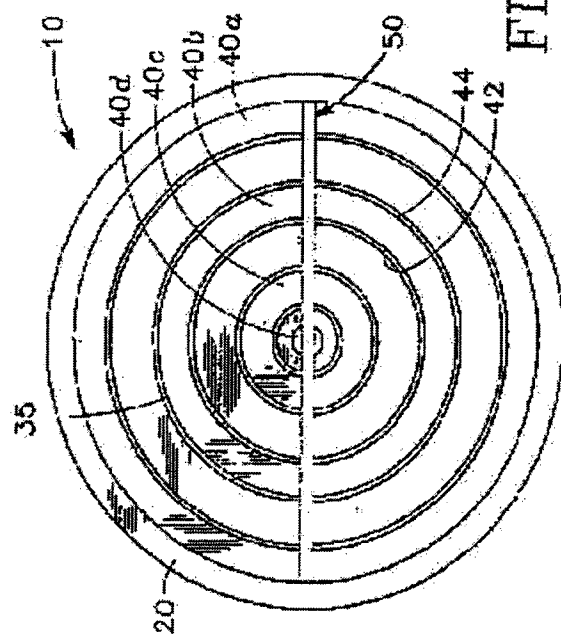


FIG. 1B

【図2A】

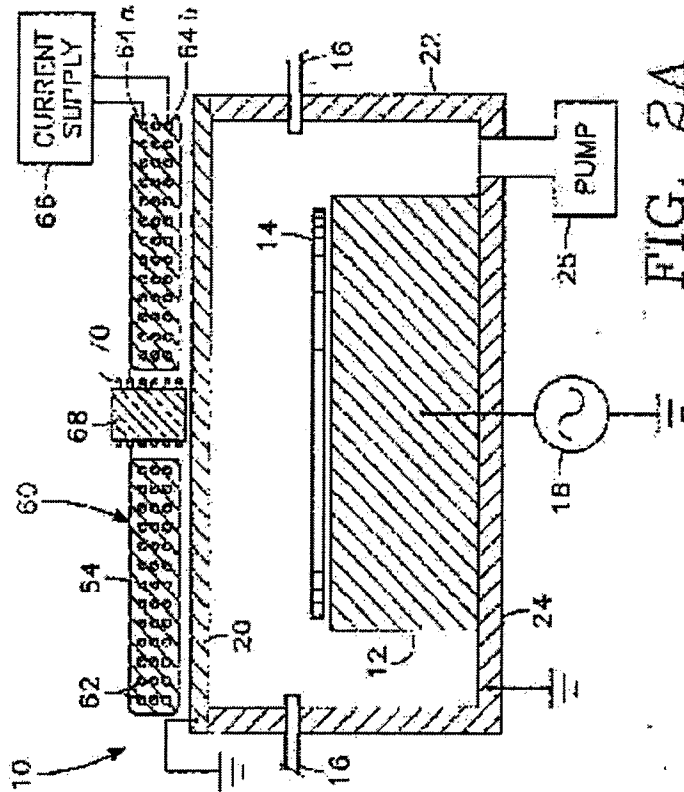


FIG. 2A

【図2B】

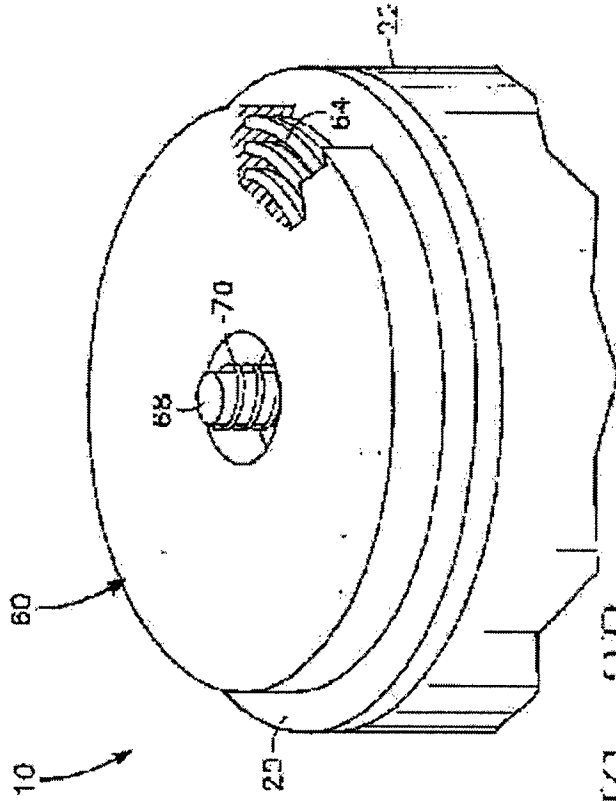


FIG. 2B

[FIG. 3A]

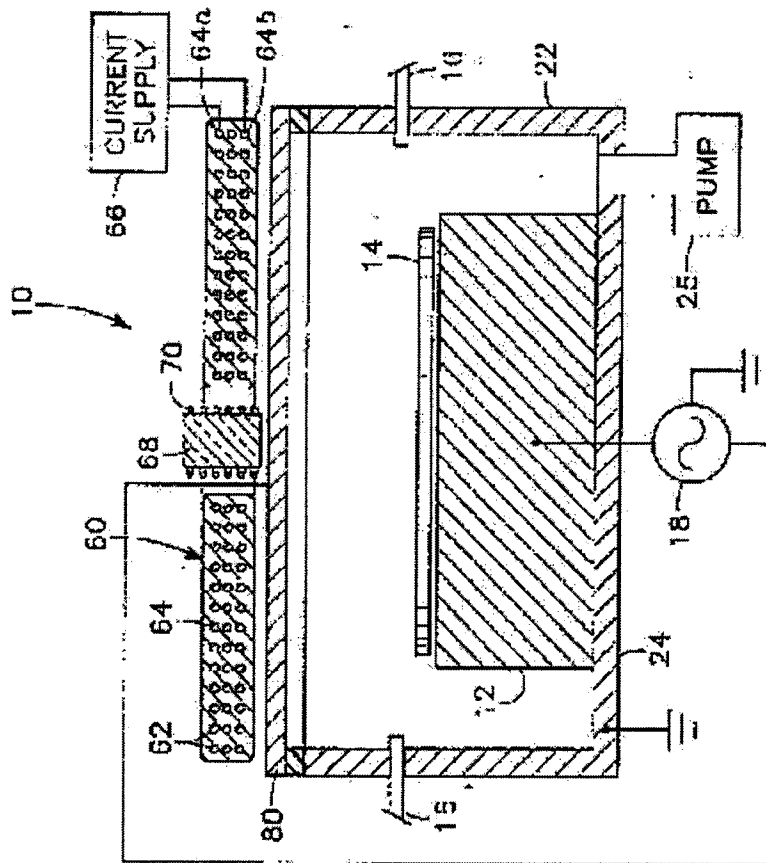


FIG. 3A

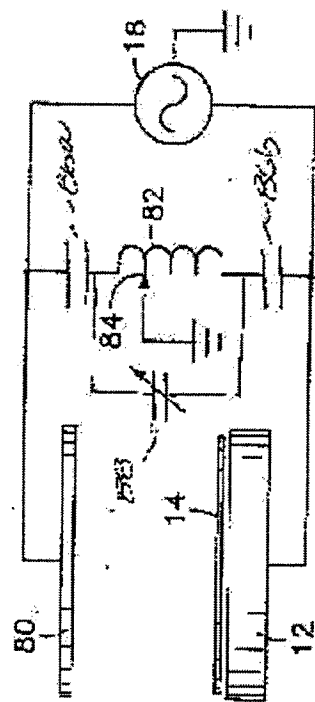


FIG. 3B

【図4A】

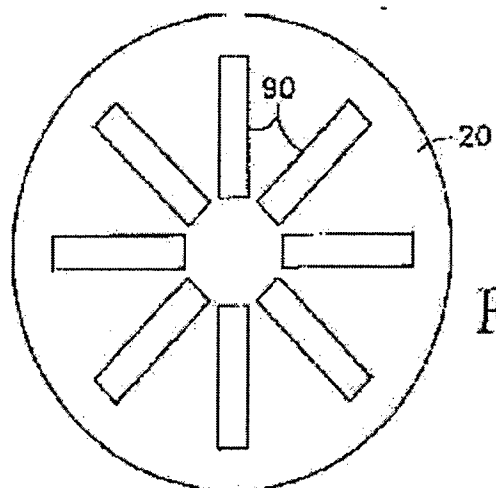


FIG. 4A



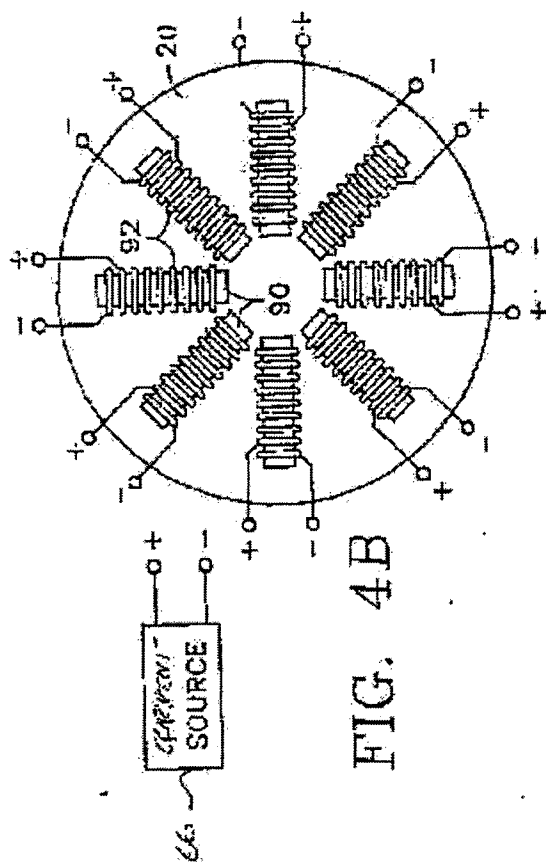
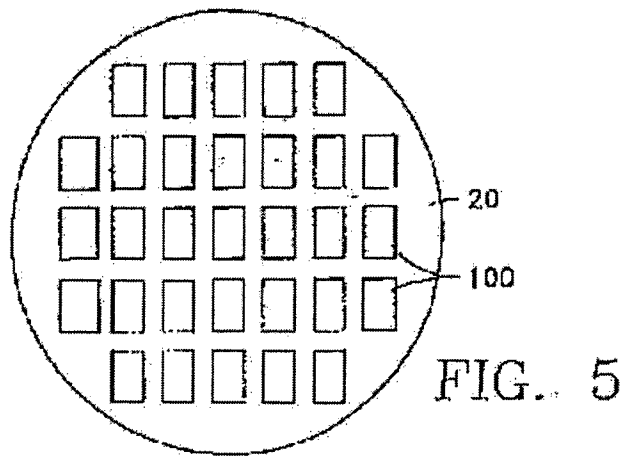


FIG. 4B

【 図 5 】



## 1. Abstract

The present invention is embodied in a plasma reactor for processing a workpiece such as a semiconductor wafer having an axis of symmetry, the reactor including a reaction chamber with a ceiling, a pedestal for supporting the workpiece within the chamber under the ceiling, a processing gas supply inlet into the chamber, an RF plasma power source coupled to the pedestal, and a magnetic field source near the ceiling providing a radially symmetrical magnetic field relative to the axis of symmetry within a portion of the chamber near the ceiling.

## 2. Representative Drawing

FIG 1A